

高速公路多联连续梁桥隔震研究

李超¹, 牟江亭², 张宇¹, 田利¹

(1. 山东大学 土建与水利学院, 山东 济南 250061; 2. 山东高速工程建设集团有限公司, 山东 济南 250014)

摘要:针对高速公路多联连续梁桥的抗震问题,本文对铅芯橡胶支座和摩擦摆支座进行了隔震效应分析与设计优化。本文基于多联有限元模型和非线性时程分析方法,分析了多联体系下各墩地震响应的差异,及铅芯橡胶支座和摩擦摆支座的隔震和耗能效果,并对隔震支座的参数布置进行了优化。结果表明:多联桥梁交界墩的地震响应较联内墩一般增大20%以上,交界墩上部结构跨径差异较大时甚至可达75%。铅芯橡胶支座位移限制能力和大震耗能更好,且屈服前刚度越大、屈服强度和屈服后刚度越小,滞回耗能能力越强;摩擦摆支座小震时即可发挥其隔震效果,且滑动摩擦系数越小、曲率半径越大,隔震效果越好。通过在交界墩布置更多隔震支座可在保证一定隔震率的同时改善桥墩受力不均匀的问题,具有一定的工程参考价值。

关键词:高速公路桥;多联连续梁桥;桥梁隔震;隔震支座;铅芯橡胶支座;摩擦摆支座;支座布置优化

DOI: 10.11990/jheu.202210001

网络出版地址: <https://link.cnki.net/kcms/detail/23.1390.U.20240219.1323.007>

中图分类号: U442.55 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7043(2024)04-0682-09

Seismic isolation analysis of highway multilink continuous girder bridges

LI Chao¹, MOU Jiangting², ZHANG Yu¹, TIAN Li¹

(1. School of Civil Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China; 2. Shandong Hi-Speed Engineering Construction Group Co., Ltd., Ji'nan 250014, China)

Abstract: This study focuses on the seismic isolation analysis of highway multilink continuous girder bridges and optimization of the lead-core rubber and friction pendulum bearings. The variations in seismic response among piers were examined first using nonlinear time history analysis of multilink finite element models. The seismic isolation and energy dissipation capabilities of lead-core rubber and friction pendulum bearings were then evaluated and compared. In the end, the parameters and layout of the isolation bearings were optimized. The results reveal that the seismic response of the junction pier between adjacent links is generally higher than that of the inner piers by approximately 20% and can even reach 75% when the spans above the junction pier exhibit large difference. The lead-core rubber bearing exhibits superior displacement-limiting and energy dissipation capacities during high intensity earthquakes. A larger stiffness prior to yielding, along with lower yield strength and post-yielding stiffness, can enhance the energy dissipation capacity. Instead, the friction pendulum bearing can demonstrate an effective isolation effect even during minor earthquakes. A smaller the sliding friction coefficient and a larger radius of curvature lead to a better seismic isolation effect. By arranging more isolation bearings at the junction piers, the problem of uneven responses among piers can be improved while maintaining an acceptable isolation rate. This study offers considerable engineering implications.

Keywords: highway bridge; multilink continuous girder bridge; bridge seismic isolation; isolation bearing; lead-core rubber bearing; friction pendulum bearing; bearing layout optimization

高速公路桥梁是重要的交通生命线,具有多联、长跨的特点,地震下一旦出现破坏极易导致交通中断从而影响灾区地震后的救援^[1-2]。为了减轻桥梁

震害,一般在桥墩与主梁间设置隔震支座,从而减小地震力对桥墩的作用,达到提高整体结构抗震效果的目标^[3]。常用的隔震支座有:多层橡胶隔震支座、铅芯橡胶支座、高阻尼橡胶支座、摩擦摆支座等,其中,铅芯橡胶支座和摩擦摆支座因其优秀的力学性能和可靠性,在中小跨径混凝土梁桥中得到广泛应用^[4-5]。目前,我国在桥梁隔震方面已取得了较

收稿日期:2022-10-03. 网络出版日期:2024-02-20.
基金项目:国家自然科学基金项目(52208178).
作者简介:李超,男,硕士研究生;
张宇,男,助理研究员,博士.
通信作者:张宇,E-mail:yu_zhang@sdu.edu.cn.

为丰富的研究成果。台玉吉等^[6]采用非线性时程分析法分析了不同减隔震支座对大跨连续梁桥抗震性能的影响,以及各支座滞回曲线和累计耗散能量。刘志华等^[7]通过振动台试验,分析了采用铅芯橡胶支座的混凝土连续梁桥在不同地震波及峰值加速度作用下的自振频率、支座变形及墩顶位移和加速度等的变化规律。李悦等^[8]通过对不同温度下墩柱、支座及桥梁系统的地震易损性分析,获得了温度对铅芯橡胶支座隔震桥梁抗震性能的影响。毛玉东等^[9]以高烈度区某大跨度连续梁桥为工程背景,从摩擦摆支座对结构基本周期的变化和阻尼耗能的角度分析其减震机理和减震效果。杨喜文等^[10]研究了摩擦效应和并联阻尼器对摩擦摆支座隔震结果的影响。然而,上述研究大多只针对高速公路桥梁的某一联进行分析,不计邻联相互作用或以简化的形式进行模拟,与高速公路桥梁工程实际存在较大差异。

本文以京雄高速泗庄枢纽互通段某多联连续梁桥为工程背景,建立全桥非线性有限元模型,分析了非隔震体系下(板式橡胶支座)各墩地震响应的差异。对比分析了铅芯橡胶支座和摩擦摆支座隔震体

系的隔震与耗能效果,并进行了参数化分析。最后,通过对支座布置形式的优化,在保证隔震率的同时改善桥墩受力不均匀问题。

1 工程概况与有限元模型

1.1 工程概况

本文选取京雄高速泗庄枢纽互通段某 5 联 16 跨预应力混凝土连续梁桥工程,其跨径布置为(3×30+3×40+4×30+3×30+3×30)m,全长 510 m,桥墩编号为 $P_1 \sim P_{17}$,如图 1 所示。主梁为预应力混凝土 T 梁,如图 2 所示,其中第 2 联梁高为 2.5 m,其余联为 2.0 m。上部结构采用 C50 混凝土,盖梁采用 C40 混凝土,桥墩采用 C35 混凝土,承台和桩基础采用 C30 混凝土。桥梁主筋为 HRB500、HRB400 级钢筋,箍筋为 HPB300 级钢筋,预应力钢束采用标准强度为 1 860 MPa,公称直径为 15.2 mm 的钢绞线。考虑非隔震与隔震 2 种情况,前者采用普通板式橡胶支座,后者考虑铅芯橡胶支座和摩擦摆支座 2 种隔震支座。交界墩 P_1 、 P_4 、 P_7 、 P_{11} 、 P_{14} 、 P_{17} 分别设置 2 排共 16 个支座,中间墩每处设置 8 个支座,全桥共设置 184 个支座。

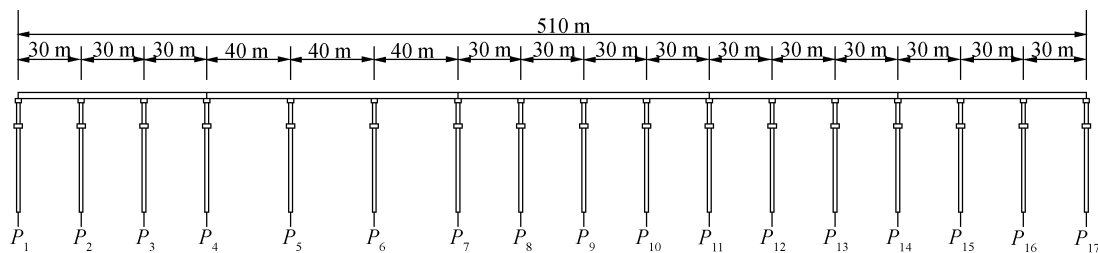


图 1 全桥布置

Fig. 1 Overall bridge layout

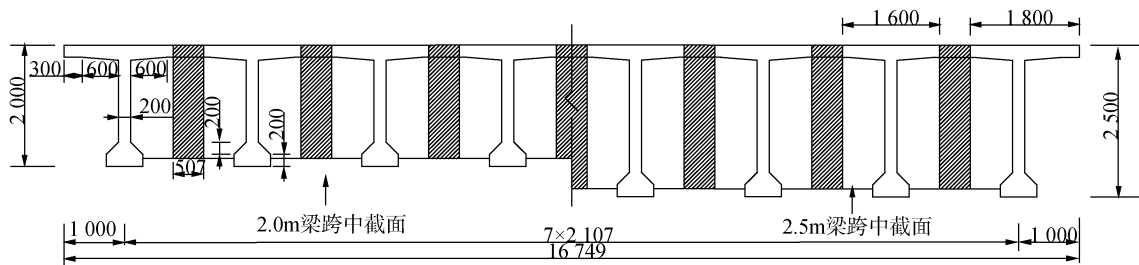


图 2 主梁截面示意 (cm)

Fig. 2 Schematic diagram of main beam section (cm)

1.2 非线性有限元模型

本文采用 Midas Civil 软件建立全桥非线性有限元模型,以纵桥向为 X 轴,横桥向为 Y 轴,竖桥向为 Z 轴,如图 3 所示。主梁、盖梁、承台、桩基础均采用线弹性梁单元模拟。桥墩采用纤维梁单元以考虑桥墩的弹塑性行为,并模拟墩底塑性铰的形成。桩基础采用水平双向分布弹簧模型模拟桩土相互作用,并采用 m 法^[11]计算弹簧刚度,桩底固结。板式橡

胶支座采用弹性连接模拟,铅芯橡胶支座和摩擦摆支座采用一般连接中的滞后系统模拟。桥梁伸缩缝采用一般连接中的间隙单元,碰撞刚度采用轴向刚度法^[12]计算。桥梁阻尼采用 Rayleigh 阻尼模型计算。

桥址设计基本加速度为 0.20g,场地类别为 II 类,抗震设防烈度为 8 度。选择 3 条具有代表性的天然地震波,分别为 El Centro Site (1940),持时

53.46 s, San Fernando (1971), 持时 61.84 s, James RD. El Centro (1979), 并将峰值加速度统一调幅至 E_2 地震强度(0.4g), 沿纵桥向(X轴)输入有限元模型。通过非线性时程分析法和直接积分法对桥梁进行响应分析, 取 3 条地震波下的最大响应值作为最不利地震响应结果。

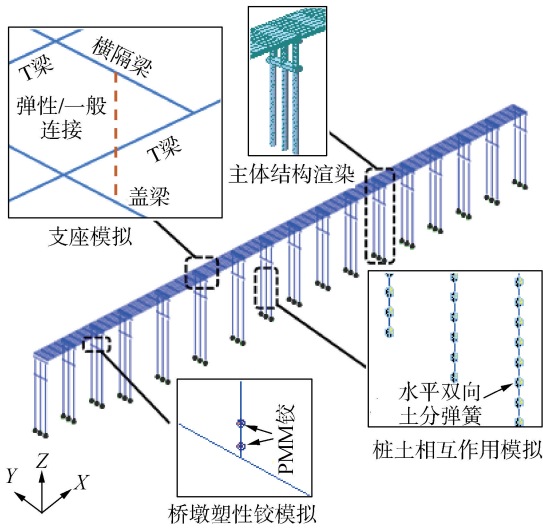


图 3 全桥有限元模型

Fig. 3 Finite element model of the full bridge

1.3 隔震支座原理

多自由度桥梁结构体系在地震作用下的运动方程^[13]为:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = -M\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

式中: M 、 C 、 K 分别为多自由度体系的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\ddot{u}_g(t)$ 为地面运动的加速度向量; $u(t)$ 、 $\dot{u}(t)$ 、 $\ddot{u}(t)$ 分别为 t 时刻桥梁结构体系相对于地面的位移、速度和加速度向量。

从运动方程(1)可以看出, 桥梁结构的抗震设计可以从改变结构的 M 、 C 、 K 方面入手, 对结构在

地震作用下的地震响应进行干扰或控制。隔震支座便是通过改变结构的刚度和阻尼来实现消能减震的目的, 并使支座在地震时尽可能先于结构构件破坏, 起到保护桥墩的作用。

2 多联连续梁桥地震响应分析

2.1 多联效应分析

图 4 为全桥模型中 E_2 地震激励下的全桥各联桥墩墩底剪力(合力)时程, 从图中可知, 各联桥墩墩底剪力(合力)时程曲线变化规律基本一致。其中, 由于第 2 联、第 3 联整体跨度较大, 导致其墩底剪力(合力)较其他几联更大。

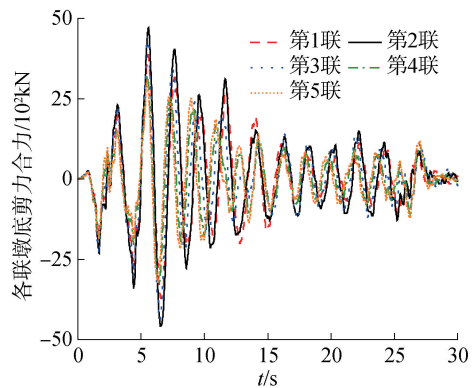


图 4 全桥各联桥墩墩底剪力(合力)时程

Fig. 4 Time history of the sum of pier bottom shears of each link of the whole bridge

为明确多联连续梁桥有限元分析在桥梁抗震分析中的必要性, 以该桥梁的第 2、3 联为目标联, 分别建立单联、3 联(即目标联与相邻 2 联)、5 联桥梁有限元模型, 研究桥墩地震响应差异。由于地震作用下桥墩的剪力、弯矩与墩顶位移的变化规律基本相同, 因此下文仅给出墩底剪力的响应结果, 如图 5 所示。

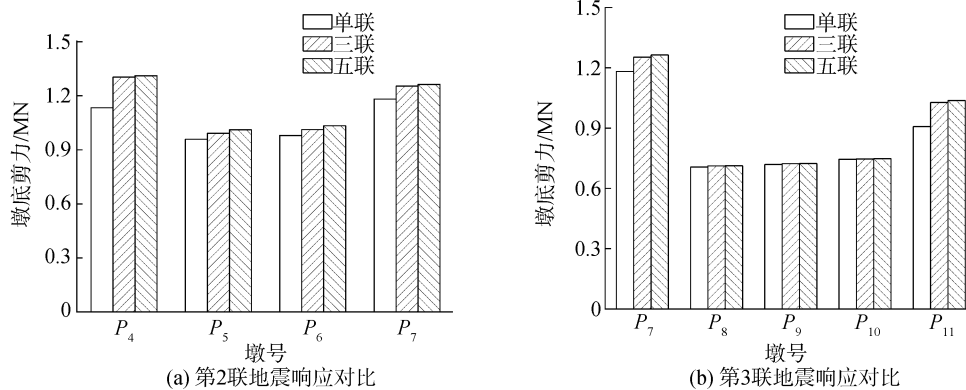


图 5 单联与多联模型地震响应对比

Fig. 5 Comparison of seismic response between the single-link and multi-link model

由图 5 可知, 同一联中各墩受力不均匀, 交界墩响应明显大于中间墩, 以交界墩 P_7 为例, 若以第 2 联为基准, 其幅约为 20% 左右, 若以第 3 联为基准,

其增幅高达 75%, 这是因为交界墩为 2 联的共用墩, 受邻联相互作用, 其受力更加不利, 特别是当交界墩上部结构跨径差异较大时。此外研究发现, 3 联模

型相较于单联模型,各墩地震响应有所增加,特别是交界墩,增幅最为明显。5联模型相较于3联模型,各墩地震响应仍有增加,但增幅有限。因此,多联连续梁桥建模分析时至少需考虑目标联的邻联,在算力允许的情况下,可以继续考虑邻联的邻联。

2.2 隔震效应分析

对于采用隔震支座的桥梁,桥梁的非弹性变形和耗能主要集中于隔震支座,而桥墩基本仍处于弹性状态。铅芯橡胶支座是由普通的橡胶支座中央插入铅芯构成,具有可有效延长桥梁周期,为桥梁振动提供良好滞回耗能性能的优点。摩擦摆支座是一种滑动摩擦摆型支座,通过钟摆原理实现隔震功能,具有隔震效果明显、自复位能力强的优点。

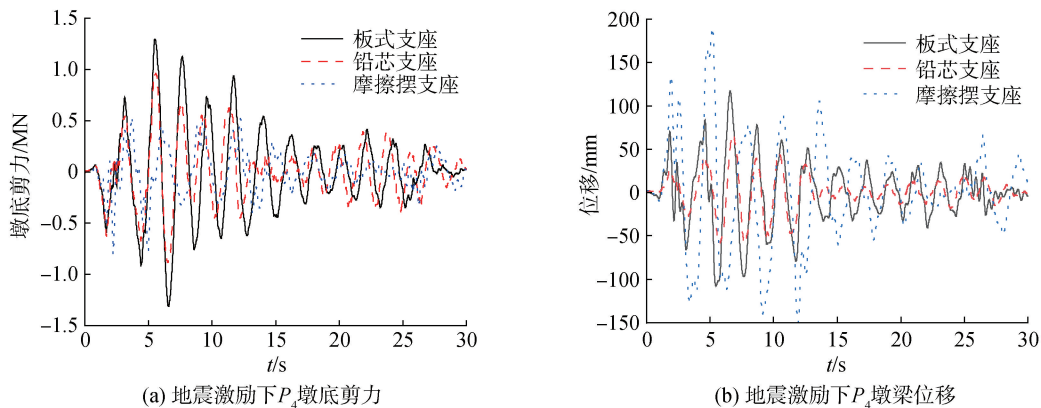


图6 隔震桥梁与非隔震桥梁地震响应对比

Fig. 6 Comparison of seismic response between isolated bridges and non-isolated bridges

从图6(a)中可以得出,采用不同隔震支座时,桥墩内力时程曲线整体变化规律一致的。在 E_2 地震激励下,铅芯橡胶支座与摩擦摆支座相较于板式支座均有一定隔震作用,墩底剪力分别减少了32.8%、39.6%,隔震效果相近。此外,从图6(b)中可以看出,铅芯支座还可有效减小地震激励下墩梁相对位移,防止桥梁发生落梁、碰撞破坏等问题;而设置摩擦摆支座后的桥梁在地震作用下墩梁相对位移大幅度增加,约为板式橡胶支座的2倍。因此,对墩梁相对位移有一定要求时,建议采用铅芯橡胶支座,如果采用摩擦摆隔震支座,应注意配合相应的限位措施。

2.3 隔震支座耗能分析

为研究隔震支座在不同强度地震下的适用性,通过峰值加速度调幅的方式将地震波调至 E_1 地震强度($0.2g$),将 E_1 地震激励下的桥梁响应与 E_2 地震激励进行对比。

在结构抗震分析中,滞回曲线最能直观地反映隔震支座的耗能能力。 E_1 与 E_2 地震下2种隔震支座滞回曲线如图7所示。 E_1 地震下,铅芯橡胶支座滞回曲线包络面积较小,其耗能、隔震效果低于摩擦

全桥隔振体系下,将所有板式橡胶支座替换为隔震支座。其中,铅芯橡胶支座型号为:Y4Q620×620,支座承载力为2700kN,最大容许位移75mm,铅芯屈服力为142kN,屈服前刚度为13.1kN/mm,屈服后刚度为2.0kN/mm,水平等效刚度为2.8kN/mm,等效阻尼比0.166。摩擦摆支座,型号为JZQZ2.5SX、JZQZ2.5DX、JZQZ2.5GD,静摩擦系数0.04,动摩擦系数0.02,曲率半径2m,支座最大容许位移100mm。

研究发现,联内各桥墩地震响应变化规律基本一致,取第2联 P_4 墩为研究对象, E_2 地震激励下隔震连续梁桥与非隔震连续梁桥墩底剪力与墩梁相对位移结果对比如图6所示。

摆支座。 E_2 地震下铅芯橡胶支座滞回曲线包络面积变得饱满,远大于摩擦摆支座,耗能、隔震效果更好。所以,当桥梁抗震设防主要以小震为主时建议优先选用摩擦摆支座,以大震为主时优先选用铅芯橡胶支座。

3 支座参数对连续梁桥地震响应影响

隔震支座型号繁多,研究隔震支座参数对桥梁减隔震性能的影响具有重要意义。下文以第2联为研究对象,对隔震支座的隔震效果进行参数化分析。

3.1 铅芯隔震支座参数化分析

根据规范^[14]可知,影响铅芯橡胶支座性能的主要因素有屈服前刚度(即弹性刚度)、屈服强度、屈服后刚度。

3.1.1 屈服前刚度的影响

将铅芯隔震橡胶支座的屈服前刚度分别设置为7.1、10.1、13.1、16.1和19.1kN/mm时分别计算桥梁结构的地震响应,得到不同屈服前刚度下墩底剪力峰值及主梁位移峰结果如图8所示。

由图8(a)可知,随着铅芯支座屈服前刚度的增加,墩底剪力均逐渐减小,但趋势有所放缓,各

墩下降幅度基本一致。由图 8(b)可知,随着铅芯橡胶支座的屈服前刚度增加,主梁位移均迅速减小;其中交界墩 P_4 、 P_7 的下降幅度明显大于中间墩。这是由于铅芯橡胶支座的屈服前刚度的增加增大了支座的滞回曲线面积从而小幅增强了耗能能力,故而减小了桥墩响应;同时,支座的屈服前刚度的增加增强了墩梁之间的连接从而加强了邻

联相互作用,故而减小了墩梁相对位移,尤其是交界墩处。

3.1.2 屈服强度的影响

将铅芯橡胶支座铅芯屈服力设置为 82、112、142、172 和 202 kN 时分别计算桥梁地震响应,得到不同铅芯屈服力下墩底剪力峰值及主梁位移峰值结果如图 9 所示。

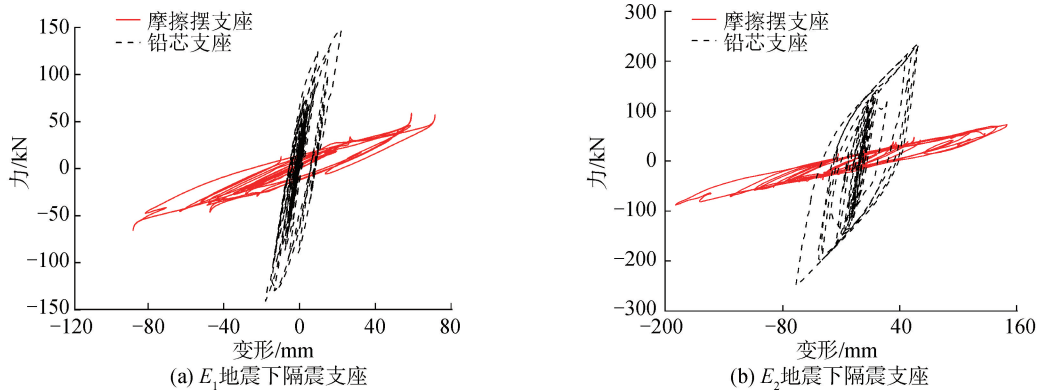


图 7 地震激励下隔震支座滞回曲线

Fig. 7 Hysteresis curves of seismic isolation bearing under seismic excitation

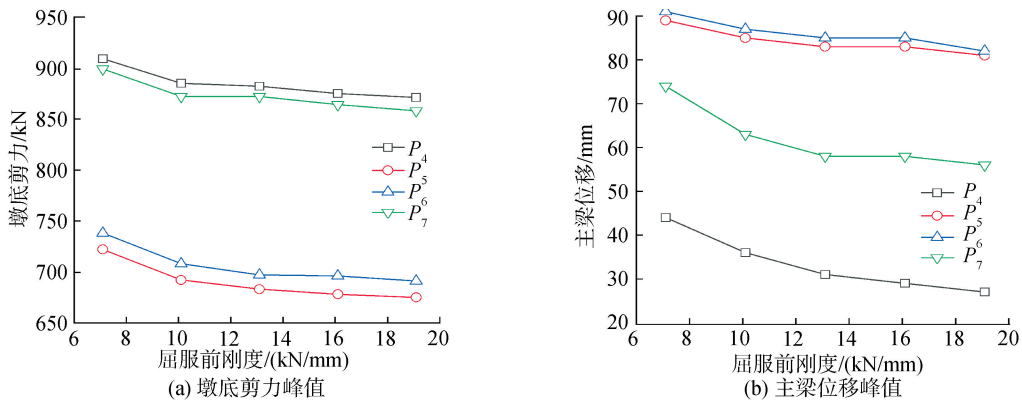


图 8 不同屈服前刚度墩底剪力及主梁位移峰值

Fig. 8 Peak values of pier bottom shear and main beam displacement with different pre-yield stiffness

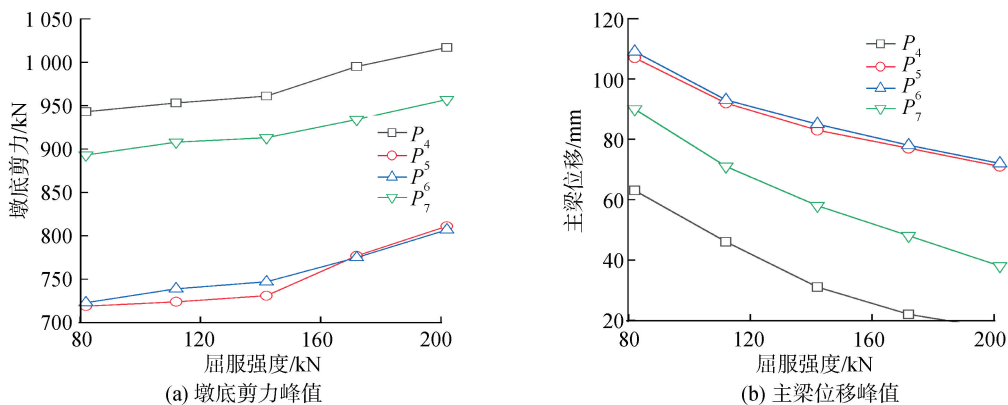


图 9 不同屈服强度下墩底剪力及主梁位移峰值

Fig. 9 Pier bottom shear force and peak displacement of main beam under different yield strengths

由图 9(a)可知,随着铅芯橡胶支座铅芯屈服力的增加,墩底剪力均呈现增加的趋势,各墩增幅基本保持一致。由图 9(b)可知,主梁位移峰值均呈现减小趋势,降幅也基本一致。出现上述结果的原因是由于铅芯屈服力增大导致支座等效刚度增加,其变

形能力也随之减弱,支座滞回曲线面积变小,耗能能力减小。

3.1.3 屈服后刚度的影响

将铅芯隔震橡胶支座屈服后刚度设置为 1、1.5、2、2.5 和 3 kN/mm 时分别计算桥梁结构地震

响应,得到不同屈服后刚度下墩底剪力峰值及主梁

位移峰结果如图 10 所示。

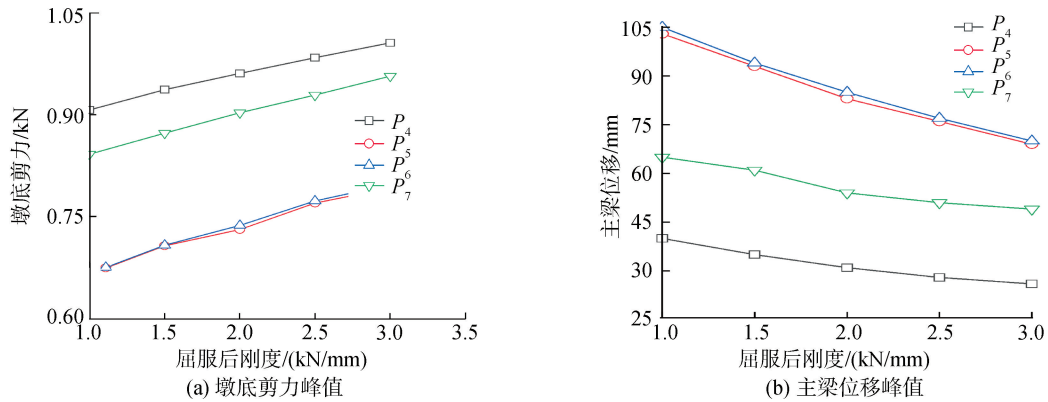


图 10 不同屈服后刚度墩底剪力及主梁位移峰值

Fig. 10 Pier bottom shear force and peak displacement of main beam after different yield stiffness

由图 10(a)可知,随着铅芯橡胶支座屈服后刚度的增加,墩底剪力均呈现增加的趋势。由图 10(b)可知,随着铅芯橡胶支座屈服后刚度的增加,主梁位移峰值均呈现减小趋势。这是由于这是由于屈服后刚度增大导致支座等效刚度增加,其变形能力也随之减弱,支座滞回曲线面积变小,耗能能力减小。

屈服力及屈服后刚度较小的支座,以增强结构体系的滞回耗能,但也应该考虑到铅芯屈服力和屈服后刚度过小将会造成墩梁相对位移即支座位移偏大,应该适当采取相关限位措施。

综上所述,铅芯橡胶支座的屈服前刚度越小或者铅芯屈服力和屈服后刚度越大,其滞回耗能的能力越差,进而导致结构地震响应增大。因此,在选用铅芯橡胶支座时,在满足支座竖向支撑强度及容许位移要求的前提下应尽量选择弹性刚度较大且铅芯

3.2 摩擦摆隔震支座参数化分析

根据规范^[15]可知,影响摩擦摆支座性能的主要因素有滑动摩擦系数和支座曲率半径等。

3.2.1 滑动摩擦系数的影响

将摩擦摆支座滑动摩擦系数设置为 0.02、0.04、0.06、0.08 和 0.1 时分别桥梁结构的地震响应,得到不同滑动摩擦系数下墩底剪力峰值及主梁位移峰值结果如图 11 所示。

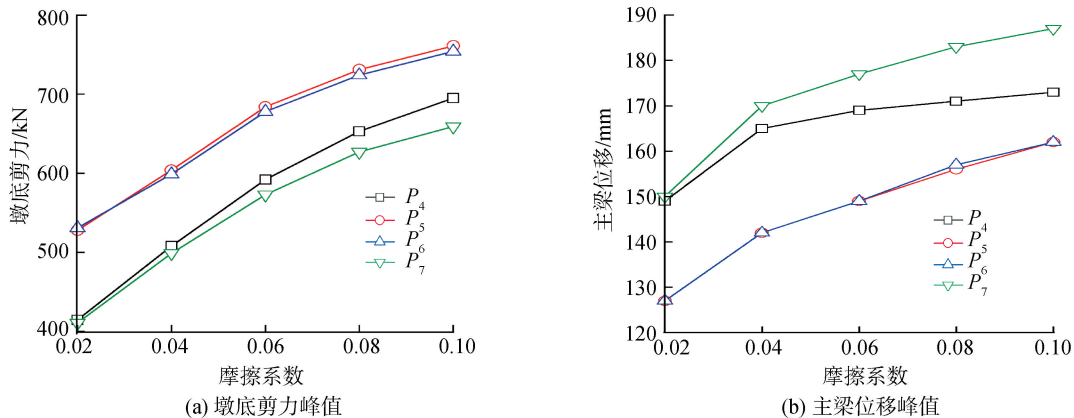


图 11 不同滑动摩擦系数下墩底剪力及主梁位移峰值

Fig. 11 Peak values of pier bottom shear and main beam displacement under different sliding friction coefficients

由图 11(a)可知,随着支座动摩擦系数的增加,墩底剪力峰值与主梁位移峰值均呈现增加趋势,且各墩增幅基本一致。由图 11(b)可知,支座滑动摩擦系数越大,则墩梁间连接效果越强,而支座滑动位移越小,其对桥墩的隔震效果势必减弱。

如图 12 所示。

3.2.2 曲率半径的影响

由图 12 可知,随着曲率半径的增加,墩底剪力峰值均呈现减小趋势,主梁位移峰值则均呈现增加趋势。这是由于曲率半径的增加降低了支座的侧向刚度,增大桥梁结构的周期,从而减小桥墩的地震响应。

将摩擦摆隔震支座曲率半径设置为 2、2.5、3、3.5、4 m 时分别计算桥梁结构地震响应,得到不同滑动摩擦系数下墩底剪力峰值及主梁位移峰值结果

综上所述,在设置摩擦摆支座时,在满足支座竖向支撑强度及容许位移要求的前提下应尽量选择滑动摩擦系数较小且曲率半径较大的支座,但曲率半

径过大将会造成墩梁相对位移过大, 支座成本也较

高, 因而需要综合考虑实际工程情况和经济合理性。

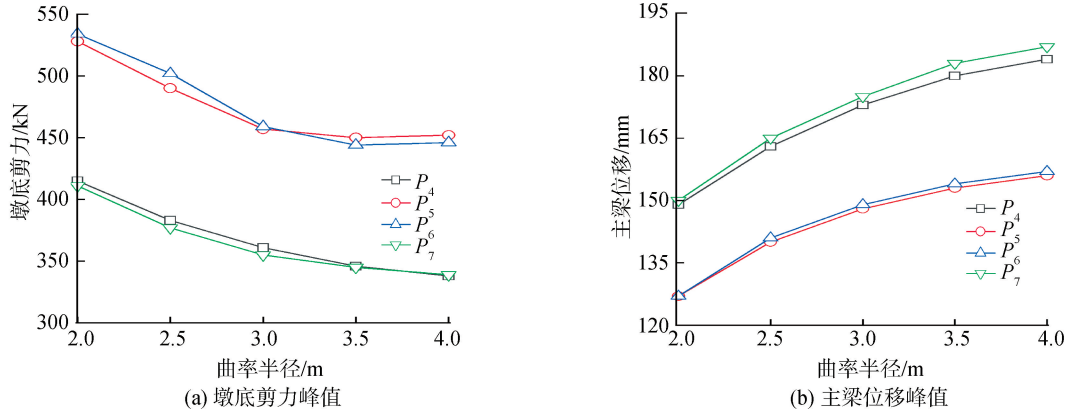


图 12 不同曲率半径下墩底剪力及主梁位移峰值

Fig. 12 Shear force at pier bottom and peak displacement of main beam under different curvature radii

4 连续梁桥隔震支座设计优化

根据 2.1 节中的分析结果, 高速公路多联连续梁桥的交界墩相较于联内墩地震响应通常偏大。考虑到实际情况下各墩截面一般为同种规格, 因此通过优化支座布置形式以及合理选取支座参数, 在保证相对较高的隔震率的前提下使同一联各桥墩间的受力尽量均匀。

4.1 支座布置优化

对于中小跨径桥梁而言, 全桥隔震方案虽然隔震效果好, 但经济性较差, 也无法改善联内桥墩的受力不均匀问题, 因而需要研究更为经济合理的隔震支座布置方案。各种工况设置如表 1 所示, 每个工况均对 2 种隔震支座进行分析。

表 1 支座布置工况

Table 1 Bearing layout conditions

工况	支座布置
工况 1	全桥布置板式支座
工况 2	P_4, P_7 布置 3 个隔震支座
工况 3	P_4, P_7 分别布置 4、3 个隔震支座
工况 4	P_4, P_7 布置 4 个隔震支座
工况 5	P_4, P_7 布置 4 个隔震支座, P_5, P_6 布置 2 个隔震支座
工况 6	P_4, P_7 布置 6 个隔震支座
工况 7	P_4, P_7 布置 6 个隔震支座, P_5, P_6 布置 2 个隔震支座
工况 8	P_4, P_7 布置 6 个隔震支座, P_5, P_6 布置 4 个隔震支座

为表征各工况下第 2 联 P_4, P_5, P_6, P_7 桥墩墩底剪力峰值的均匀化程度, 取其均方差, 均方差越大, 表明数据集越离散, 反之越均匀, 结果见表 2。此外, 以工况 1 模型为“基础模型”定量分析结构采用不同支座布置方式后的隔震效果, 定义相对基础模型的隔震率 η 为:

$$\eta = (A - B) / A \quad (2)$$

式中: A 为基础模型的墩底剪力合力时程曲线峰值;

B 为实验工况下的模型墩底剪力合力时程曲线峰值。各支座工况均方差和隔震率结果见表 2。

表 2 各支座布置工况均方差和隔震率

Table 2 Mean square errors and isolation rates of each bearing layout condition

工况	均方差		隔震率/%	
	摩擦摆支座	铅芯支座	摩擦摆支座	铅芯支座
	70.4			
工况 1	(板式橡胶)		0	0
工况 2	38.5	43.3	20.1	11.9
工况 3	32.2	56.4	20.7	13.9
工况 4	61.1	52.4	19.3	12.2
工况 5	38.0	71.1	17.0	16.8
工况 6	126.0	58.8	15.9	14.8
工况 7	71.3	80.7	31.8	20.7
工况 8	45.3	94.6	36.6	18.6

由表 2 可知, 摩擦摆支座在工况 3 中各墩受力最均匀, 隔震率也相对较高 (20.7%), 在工况 8 下隔震效果显著增强 (36.6%), 但是各墩受力差异也相应增大。铅芯橡胶支座在工况 2 下各墩受力相对最均匀但隔震效果一般 (11.9%), 在工况 7 下隔震率最高 (20.7%) 但联内桥墩受力过大。综合考虑隔震率和各墩受力均匀程度, 将工况 3、6 分别选为摩擦摆支座和铅芯橡胶支座的最优布置工况, 相应第 2 联墩底剪力时程曲线如图 13 所示。

4.2 支座参数优化

以中 3.1.1 节和 3.2.2 节所研究的铅芯橡胶支座屈服前刚度和摩擦摆支座曲率半径参数为依据, 支座屈服前刚度或曲率半径增大均可降低结构地震响应。在 2 种较优工况基础上, 改变交界墩处铅芯橡胶支座屈服前刚度为 10.1 kN/mm, 摩擦摆支座曲率半径为 2.5 m, 其余支座参数不变, 优化后模型不同桥墩处墩底剪力峰值优化模型与原模型对比如图 14 所示。

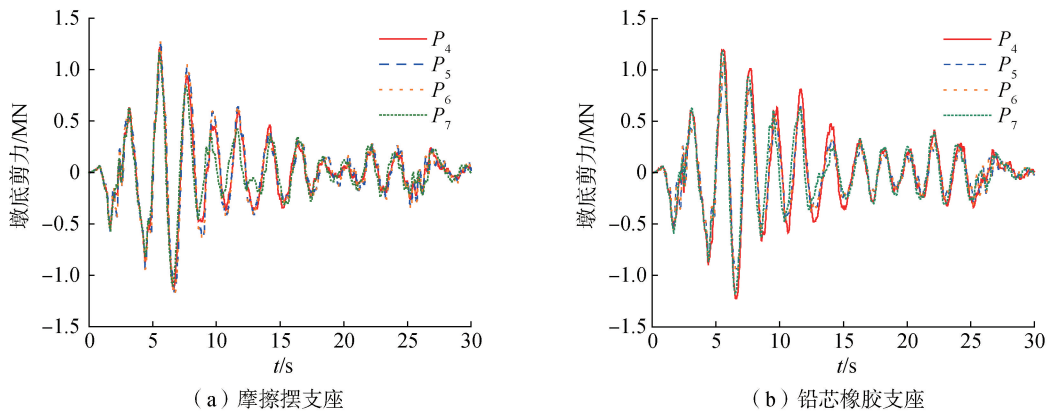


图 13 第 2 联墩底剪力时程曲线

Fig. 13 Time-history curves of bottom shear force of the second coupled pier

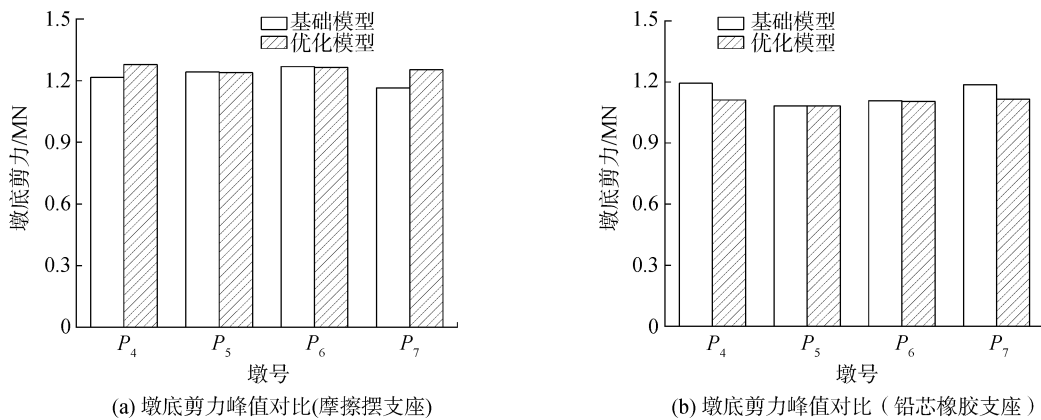


图 14 优化模型与原模型墩底剪力峰值对比

Fig. 14 Comparison of shear peak values at pier bottom between the optimized model and the original model

由图 14 可知,对支座参数优化后的模型相较于原模型在地震作用下交界墩与中间墩内力明显更加均匀,基本达到了预期设计目标。

综上所述,当对地震激励下桥墩受力均匀性有需求的时候,建议在交界墩合理布置隔震支座,并通过支座参数的优化,以保证一定隔震能力的基础上实现联内桥墩受力相对均匀。

5 结论

1)地震作用下,高速公路多联连续梁桥的交界墩响应明显大于中间墩,同一联中各墩受力不均匀的特性不容忽略。对目标联进行分析时,应考虑目标联与邻联的相互作用,建立多联模型。

2)隔震体系下,铅芯橡胶支座大震耗能和位移限制能力更好,而摩擦摆支座小震时即可发挥其隔震效果,但墩梁相对位移较大,应注意配合限位措施。

3)为实现更好的隔震效果,在选用铅芯橡胶支座时,在满足强度及位移要求的前提下应尽量选择弹性刚度较大且铅芯屈服力及屈服后刚度较小的支座。在选用摩擦摆支座时,在满足强度及位移要求的前提下应尽量选择滑动摩擦系数较小且曲率半径

较大的支座。

4)通过在交界墩布置部分隔震支座以及对支座的参数合理选择,可在保证隔震效果的同时改善交界墩和联内墩受力不均匀的问题。

参考文献:

[1] Pişkin M (2023) Analyzing regional economic impacts of expected Istanbul earthquake: indirect effects of highway disruptions and lifeline outages. Turkey: iksad publishing house.

[2] 石岩, 李军, 秦洪果, 等. 减隔震桥梁设计方法及抗震性能研究综述[J]. 地震工程学报, 2019, 41(5): 1121-1132.
SHI Yan, LI Jun, QIN Hongguo, et al. Review on design methods and seismic performances of seismically isolated bridges[J]. China earthquake engineering journal, 2019, 41(5): 1121-1132.

[3] 赵人达, 贾毅, 占玉林, 等. 强震区多跨长联连续梁桥减隔震设计[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(5): 886-895.
ZHAO Renda, JIA Yi, ZHAN Yulin, et al. Seismic mitigation and isolation design for multi-span and long-unit continuous girder bridge in meizoseismal area[J]. Journal of Zhejiang University (engineering science), 2018, 52(5): 886-895.

- [4] 姜焱培, 周晓敏. 不同人工地震波作用下铅芯橡胶支座桥梁减震性能分析[J]. 公路, 2019, 64(4): 155-159. JIANG Yanpei, ZHOU Xiaomin. Analysis of seismic performance of lead rubber bearing bridge under different artificial seismic waves[J]. Highway, 2019, 64(4): 155-159.
- [5] 刘正楠, 陈兴冲, 张永亮, 等. 近远场地震作用下基于摩擦摆支座的高速铁路连续梁桥减隔震研究[J]. 中国铁道科学, 2019, 40(1): 47-54. LIU Zhengnan, CHEN Xingchong, ZHANG Yongliang, et al. Research on seismic mitigation and isolation of continuous beam bridge for high speed railway based on friction pendulum bearing under near-and-far field ground motions[J]. China railway science, 2019, 40(1): 47-54.
- [6] 台玉吉, 孙呈凯, 许贺洪. 地震作用下大跨连续梁桥隔震支座研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2021, 43(5): 96-103. TAI Yuji, SUN Chengkai, XU Heqi. Study on isolation bearing of long span continuous beam bridge under earthquake action[J]. Earthquake resistant engineering and retrofitting, 2021, 43(5): 96-103.
- [7] 刘志华, 韩之江, 王磊. 铅芯橡胶支座 PC 连续梁桥隔震性能试验研究[J]. 桥梁建设, 2016, 46(5): 18-23. LIU Zhihua, HAN Zhijiang, WANG Lei. Experimental study of seismic isolation performance of PC continuous beam bridge using lead-rubber bearings[J]. Bridge construction, 2016, 46(5): 18-23.
- [8] 李悦, 高崇铭, 李冲, 等. 温度对铅芯橡胶支座隔震桥梁抗震性能的影响分析[J]. 世界地震工程, 2020, 36(4): 178-184. LI Yue, GAO Chongming, LI Chong, et al. Effect of temperature on seismic performance of lead rubber bearing isolated bridges[J]. World earthquake engineering, 2020, 36(4): 178-184.
- [9] 毛玉东, 李建中. 大跨连续梁桥纵向减震机理和减震效果分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(2): 185-191. MAO Yudong, LI Jianzhong. Analysis of seismic mitigation mechanism and effect on longitudinal direction of long-span continuous bridges[J]. Journal of Tongji University (natural science), 2016, 44(2): 185-191.
- [10] 杨喜文, 李建中, 雷昕弋. 多孔大跨度连续梁桥减隔震技术应用研究[J]. 中国公路学报, 2010, 23(6): 58-65. YANG Xiwen, LI Jianzhong, LEI Xinyi. Research on application of seismic isolation techniques to multiple and large-span continuous girder bridge[J]. China journal of highway and transport, 2010, 23(6): 58-65.
- [11] 刘立平, 李英民, 韩军. 桩-土-结构相互作用对结构弹塑性变形特性的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(5): 66-71. LIU Liping, LI Yingmin, HAN Jun. Study on influence of pile-soil-structure dynamic interaction on structural elastoplastic deformation[J]. Journal of earthquake engineering and engineering vibration, 2007, 27(5): 66-71.
- [12] COLE G, DHAKAL R, CARR A, et al. An investigation of the effects of mass distribution on pounding structures[J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 2011, 40(6): 641-659.
- [13] (美)陈惠发, (美)段炼主编. 桥梁工程抗震设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [14] 交通运输部. 公路桥梁铅芯隔震橡胶支座: JT/T 822—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012. Lead-core isolated rubber bearings for highway bridges: JT/T 822—2011[S]. Beijing: China Communications Press, 2012.
- [15] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 建筑摩擦摆隔震支座: GB/T 37358—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019. Standardization Administration of the People's Republic of China. Friction pendulum isolation bearings for buildings: GB/T 37358—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.

本文引用格式:

- 李超, 牟江亭, 张宇, 等. 高速公路多联连续梁桥隔震研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2024, 45(4): 682-690. LI Chao, MOU Jiangting, ZHANG Yu, et al. Seismic isolation analysis of highway multilink continuous girder bridges[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2024, 45(4): 682-690.